

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**CLIMATIC RESOURCES****КЛИМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

УДК 551.58

В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, Ю. А. Бровка*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: ecology@basnet.by***ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
АРКТИЧЕСКИХ ВТОРЖЕНИЙ**

Аннотация. Рассмотрены многолетние изменения продолжительности арктических вторжений (ПАВ) и их связи с циклонической деятельностью и характеристиками общей циркуляции атмосферы (Арктическим, Северо-Атлантическим и Тихоокеанским колебаниями). Оценены взаимосвязи ПАВ в различных секторах Северного полушария за период 1899–2017 гг. и проведен анализ их линейных трендов за весь исследуемый период и его отдельные подпериоды. Показано, что временные ряды ПАВ удовлетворительно описываются трехкомпонентной моделью, включающей линейный тренд и две гармонические компоненты с периодами 20–30 и 50–60 лет.

Ключевые слова: арктическое вторжение, элементарный циркуляционный механизм, сектор Северного полушария

V. F. Loginov, S. A. Lysenko, Yu. A. Brovka*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: ecology@basnet.by***TEMPORAL AND SPATIAL VARIABILITY OF ARCTIC INVASIONS DURATION**

Abstract. This paper reports long-term changes in the Duration of Arctic Invasions (DAI) and their relationship with cyclonic activity and characteristics of the general circulation of the atmosphere (Arctic, North Atlantic and Pacific oscillations). We assessed the relationships of DAI in various sectors of the Northern Hemisphere for the period of 1899–2017 and also we analyzed their linear trends for the entire study period and its individual subperiods. It is shown that the time series of DAI could be satisfactorily described by a three-component model that includes a linear trend and two harmonic components with the periods of 20–30 and 50–60 years.

Keywords: Arctic invasion, elementary circulation mechanism, Northern Hemisphere sector

У. Ф. Логінаў, С. А. Лысенка, Ю. А. Броўка*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
Мінск, Беларусь, e-mail: ecology@basnet.by***ЧАСАВАЯ І ПРАСТОРОВАЯ ЗМЕНЛІВАСЦЬ ПРАЦЯГЛАСЦІ АРКТЫЧНЫХ УВАРВАННЯЎ**

Анотацыя. Разгледжаны шматгадовыя змяненні працягласці арктычных уварванняў (ПАУ) і іх сувязі з цыкланічнай дзейнасцю і характарыстыкамі агульнай цыркуляцыі атмасферы (Арктычным, Паўночна-Атлантычным і Ціхаакіянскім ваганнямі). Ацэнены ўзаемасувязі ПАУ ў розных сектарах Паўночнага паўшар'я за перыяд 1899–2017 гг. і праведзены аналіз іх лінейных трэндаў за ўвесь доследны перыяд і яго асобныя падперыяды. Паказана, што часавыя рады ПАУ здавальняюча апісваюцца трохкампанентнай мадэллю, у якую ўваходзяць лінейны трэнд і дзве гарманічныя кампаненты з перыядамі 20–30 і 50–60 гадоў.

Ключавыя словы: арктычнае ўварванне, элементарны цыркуляцыйны механізм, сектар Паўночнага паўшар'я

Введение. Арктическое вторжение – это вторжение массы арктического воздуха в средние широты. Оно сопровождается понижением температуры и влагосодержания атмосферы. Поскольку арктический воздух более тяжелый, то арктическое вторжение сопровождается ростом атмосферного давления. Арктические вторжения происходят в тылу циклонов, развивающихся или регенерирующих на арктическом фронте. Большая повторяемость и продолжительность арктических вторжений приводит к формированию суровых зим в средних широтах, причем арктические вторжения нередко достигают и субтропических широт.

Вопросами изменения глобальной циркуляции атмосферы за период с 1899 г. до настоящего времени занимаются ученые Института географии РАН, используя типизацию циркуляции атмосферы Северного полушария Б. Л. Дзердзеевского, В. М. Курганской и З. М. Витвицкой [1]. Идеи Б. Л. Дзердзеевского получили дальнейшее развитие в работах Н. К. Кононовой [2–4]. Ею проанализированы разработанные С. С. Савиной и Л. В. Хмелевской новые динамические схемы элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ), отражающие географическое положение и площади областей высокого и низкого давления в Северном полушарии. Рассмотрен внутритроговой ход (с суточным осреднением) и изменение многолетней продолжительности каждого ЭЦМ. Установлено, что характер циркуляции атмосферы внетропических широт Северного полушария определяют главным образом меридиональные процессы (северные и южные) [2].

Н. К. Кононовой [3, 4] выявлены особенности колебания циркуляции атмосферы во внетропических широтах всего Земного шара за период с 1899 по 2017 г. Выделены три циркуляционные эпохи, различающиеся преобладающей группой циркуляционных механизмов: эпоха блокирующих процессов, соединяющих арктический/антарктический и субтропический антициклоны, зональная эпоха и эпоха выходов циклонов из низких широт в высокие. В работе [4] выявлена связь колебаний глобальной среднегодовой температуры воздуха с колебаниями глобальной циркуляции атмосферы (циркуляционными эпохами). Статистические связи продолжительности арктических вторжений (ПАВ) в Атлантическом и Тихоокеанском секторах Северного полушария с изменениями климатических индексов, характеризующих Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК), исследованы в работе [5].

Предметом нашего исследования является анализ временных изменений ПАВ в шести секторах Северного полушария за период с 1899 по 2017 г. и их связи с различными характеристиками общей циркуляции атмосферы.

Материалы исследований. В качестве исходных данных использованы продолжительности различных ЭЦМ в Северном полушарии с 1899 по 2017 г., предоставленные Институтом географии РАН. Использовалась типизация атмосферной циркуляции Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому [1], основным признаком которой явилось наличие или отсутствие блокирующих процессов (арктических вторжений) на полушарии, их направление и количество. В отдельную группу были выделены процессы с циклонической циркуляцией на Северном полюсе. В используемой типизации выделено 4 группы и 13 типов циркуляции, 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ – основная единица типизации). В пределах одного типа имеются различия ЭЦМ в направлениях арктических вторжений или выходов южных циклонов, а также сезонные различия ЭЦМ по знаку барических полей над океанами и континентами [2].

Ограниченное число наземных станций и низкая плотность радиозондовых наблюдений в первой половине предыдущего столетия обуславливают значительную неоднородность анализируемых данных. И только в послевоенное время в конце 40-х годов прошлого столетия плотность метеорологической сети на территории Земного шара превысила 50 % [6]. Принимая во внимание это обстоятельство, кроме анализа всего доступного ряда, нами отдельно выполнен анализ ПАВ за послевоенный период с 1948 по 2017 г., который включает почти 70 % всей доступной информации. Однако и для этого 70-летнего периода плотность сети в таких секторах, как Тихоокеанский и Атлантический, недостаточна для надежных оценок изменений ПАВ. Блокирующие ЭЦМ в использованной классификации Б. Л. Дзердзеевского [1] для различных секторов Северного полушария приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Блокирующие ЭЦМ для различных секторов Северного полушария

Сектор	Блокирующие ЭЦМ
Атлантический (60° W–0°)	3, 8а, 8бл, 8гз, 8гл, 9а, 9б, 12а, 12бз, 12бл
Европейский (0°–60° E)	4а, 4б, 4в, 8бз, 10а, 10б, 12вз
Сибирский (60° E–120° E)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 8бл, 8вз, 8вл, 8гз, 8гл, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г
Дальневосточный (120° E–170° E)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 12вл, 12г
Тихоокеанский (170° E–120° W)	6, 8вз, 8вл, 9а, 12а, 12г
Американский (120° W–60° W)	7аз, 7ал, 7бз, 7бл, 8а, 10а, 10б, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г

В качестве показателей атмосферной циркуляции использованы морфометрические характеристики основных центров действия атмосферы, индексы Северо-Атлантического колебания, а также повторяемость и пути перемещения циклонов в Атлантическом и Европейском секторах.

Результаты исследований и их обсуждение. Оценка тесноты связи ПАВ в различных секторах Северного полушария. Анализ блокирующих ЭЦМ показал, что только в двух парах секторов (Европейском и Тихоокеанском, Европейском и Атлантическом) отсутствуют общие ЭЦМ. Во всех других парах секторов число общих ЭЦМ изменяется от 2 до 10. Для Атлантического и Тихоокеанского секторов имеются два общих ЭЦМ: 9а и 12а. Для других, в основном континентальных секторов, количество общих ЭЦМ существенно больше: для Американского и Дальневосточного сектора число общих ЭЦМ равно 9 (11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 12вл, 12г), а общее число ЭЦМ составляет 21.

Стоит заметить, что наличие общих ЭЦМ для различных секторов Северного полушария обеспечивает ложную корреляцию ПАВ в сопоставляемых секторах. В частности, если X , Y , Z – независимые переменные, коэффициенты вариации которых соответственно V_x , V_y , V_z , то между рядами величин $\frac{X}{Z}$ и $\frac{Y}{Z}$ имеет место корреляция

$$r = \frac{V_z}{\sqrt{(V_x^2 + V_z^2)(V_y^2 + V_z^2)}}.$$

В Северном полушарии имеются только две пары секторов – Тихоокеанский и Европейский, а также Атлантический и Европейский, где общие ЭЦМ отсутствуют. Коэффициент корреляции ПАВ в этих секторах составляет $-0,67$ для всего доступного ряда и $-0,62$ для части ряда (1948–2017 гг.). Связи ПАВ в Атлантическом и Европейском секторах несколько слабее: коэффициент корреляции составляет $-0,42$ для всего доступного ряда и $-0,45$ для периода с 1948 по 2017 г., но даже в последнем случае величина коэффициента корреляции превышает ошибку его вычисления более чем в 5 раз, что свидетельствует о крайне низкой вероятности случайности установленной связи ($P_{\text{случ}} < 0,1\%$).

Более сложный характер линейных связей ПАВ характерен для Европейского и Американского секторов. Здесь коэффициенты корреляции исходных данных ПАВ составляют 0,4, что выше коэффициента ложной корреляции ПАВ в этих секторах, возникающей из-за наличия общих ЭЦМ. Положительные коэффициенты обусловлены наличием значительной линейной составляющей – отрицательным трендом ПАВ в обоих секторах. Однако знак корреляции на более высоких частотах (ω): $\omega = 2\pi/T$, где T – период, равный 49 годам, отрицательный.

Обнаруженные особенности в характере связи ПАВ для различных секторов – отрицательная связь в Европейском и Тихоокеанском, Европейском и Атлантическом секторах; положительная связь на низкой частоте (тренде) и отрицательная связь на более высокой частоте в Европейском и Американском секторах – могут быть использованы при разработке подходов и методов сверхдолгосрочного прогнозирования ПАВ.

Полученные результаты позволяют предвидеть асинхронность в развитии метеорологических процессов в Европейском секторе, с одной стороны, Тихоокеанском и Атлантическом секторах Северного полушария – с другой, как на низкой частоте (тренде), так и более высокой частоте (период около 50 лет). В развитии метеорологических процессов в Европейском и Американском секторах отмечается синхронность на низкой частоте (тренде) и асинхронность на более высокой частоте (период около 50 лет). Таким образом, ПАВ будет падать в Европейском секторе одновременно с ростом ПАВ в Атлантическом и Тихоокеанском секторах, тогда как в Американском и Европейском секторах рост и падение ПАВ будет синхронным на низкой частоте (тренде) и асинхронным на более высокой частоте ($T \sim 50$ лет).

Рассмотрим возможные причины синхронных и асинхронных изменений ПАВ в разных секторах Северного полушария. Известно, что зональность изотерм существенно искажается, особенно зимой, под влиянием материков и океанов. Это вносит возмущение в поле средней температуры воздуха во всей толще тропосферы. Оно хорошо видно на картах относительной

топографии для января и июля, характеризующих распределение по Земному шару средней температуры нижнего 9-километрового слоя атмосферы. Над континентами образуются ложбины холода, а над океанами – гребни тепла.

В июле, наоборот, гребни тепла расположены над прогретыми континентами, но гребни и ложбины в этот сезон выражены менее ярко, чем зимой. Принимая во внимание это обстоятельство, рассмотрим изменения ПАВ в Дальневосточном и Американском секторах отдельно в холодное и теплое время года, предварительно отметив, что сезонные ложбины и гребни лучше выражены над Дальневосточным сектором, нежели над Американским. Это определяется большей площадью Евразийского материка, по сравнению с Североамериканским. В этих секторах более половины ЭЦМ являются общими как в годовом, так и сезонном разрезах. Для Европейского сектора ($0^\circ - 60^\circ$ в.д.) предикторами для прогнозов ПАВ большой заблаговременности могут быть процессы, развивающиеся на противоположной стороне Земного шара – в Тихоокеанском (170° в.д. – 120° з.д.) и Американском (120° з.д. – 60° з.д.) секторах. Это, вероятно, связано с расположением двух главных океанов – Тихого и Атлантического – на противоположных сторонах Земли. Последние обеспечивают формирование двух главных для Северного полушария центров действия атмосферы – Исландского и Алеутского минимумов. Активная муссонная циркуляция в Тихоокеанском секторе и Индийском океане обязаны большой протяженности Евразийского материка, чего не может обеспечить Американский континент в силу меньшей протяженности, по сравнению с Евразийским.

Фрагментарное сопоставление морфометрических характеристик Алеутского и Гонулупского центров действия с продолжительностью арктических вторжений, температурой воды и воздуха в Тихоокеанском секторе обнаруживает наличие форсинга центров действия на климатические характеристики региона. Так, падение температуры воды в субарктической зоне Тихого океана связано с ростом продолжительности арктических вторжений в Тихоокеанский сектор. Прямая связь температуры воды отмечается и с изменениями давления в центре Алеутского минимума. Трендовое изменение площади Алеутского минимума согласуется с трендовой составляющей в изменении ПАВ. Положительная связь площади Алеутского минимума и ПАВ также заметна и в полосе средних частот их многолетних изменений. Статистика продолжительности арктических вторжений для разных периодов времени приведена в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Среднее значение / среднеквадратические отклонения ПАВ для разных секторов и периодов (число дней)

Период	Сектор					
	Тихоокеанский	Европейский	Атлантический	Американский	Дальневосточный	Сибирский
1899–2017	55 / 31	61 / 29	101 / 34	187 / 39	134 / 33	135 / 33
1899–1948	35 / 16	82 / 22	87 / 19	209 / 32	148 / 32	146 / 30
1948–2017	69 / 32	47 / 25	111 / 39	171 / 36	123 / 31	127 / 33

Из табл. 2 следует, что в океанических секторах Северного полушария средние значения и среднеквадратические отклонения ПАВ в период с 1948 по 2017 г. существенно увеличились по сравнению с предыдущим периодом, тогда как в континентальных секторах (Американском, Дальневосточном и Сибирском) средние значения ПАВ уменьшились, а среднеквадратические отклонения не претерпели каких-либо существенных изменений. Несколько другая ситуация отмечается в континентальном Европейском секторе. Здесь среднее значение ПАВ в последние десятилетия уменьшилось в 1,74 раза, а среднеквадратическое отклонение ПАВ незначительно увеличилось.

Таким образом, наибольший рост величин первых двух статистических моментов ПАВ – средних значений и среднеквадратических отклонений – произошел в океанических секторах Северного полушария. Это особенно характерно для изменений среднеквадратических отклонений ПАВ.

Анализ линейных трендов продолжительности арктических вторжений (ПАВ) для различных секторов Северного полушария. Принимая во внимание неоднородность в изменении циркуляционных процессов, связанную с изменением плотности метеорологиче-

ской сети, доступный ряд продолжительности арктических вторжений для различных секторов Северного полушария разбит на два периода (рис. 1).

На рис. 1 и в табл. 3 приведены значения ПАВ, линейные тренды, коэффициенты линейных трендов и коэффициенты корреляции для секторов Северного полушария. Видно, что для 70-летнего ряда (1948–2017 гг.) наблюдаются восходящие линейные тренды для четырех из шести секторов: Тихоокеанского, Атлантического, Дальневосточного и Сибирского. Наиболее существенный рост ПАВ отмечается в Тихоокеанском и Атлантическом секторах. В Европейском секторе наблюдается падение ПАВ со скоростью, близкой к скорости роста ПАВ в Атлантическом секторе. В других секторах скорость роста ПАВ существенно меньше и статистически незна-

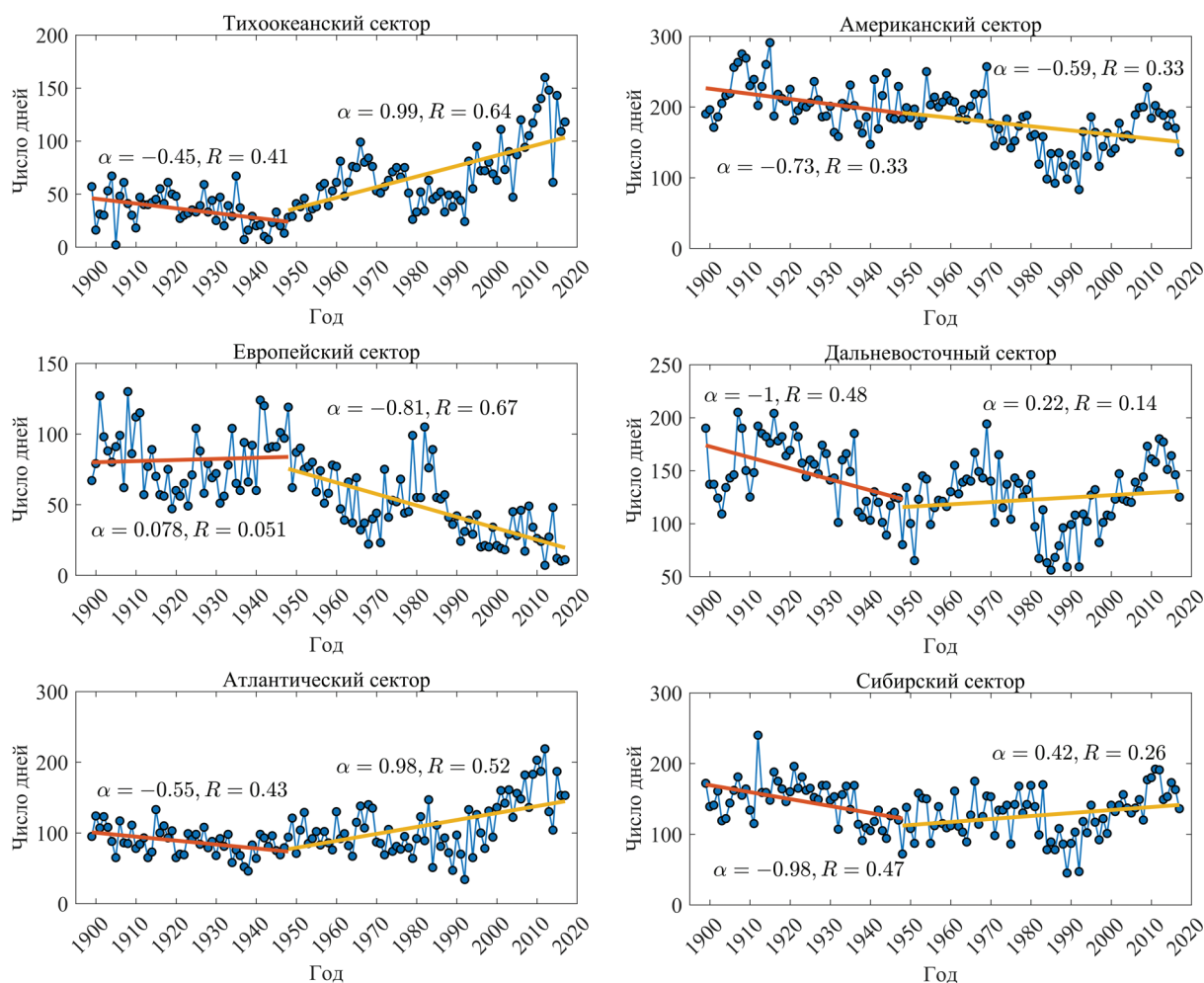


Рис. 1. Линейные тренды изменения числа дней с арктическими вторжениями в периоды 1899–1948 и 1948–2017 гг.

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициентов линейных трендов (α) и корреляции (R) для разных секторов и периодов времени

Название сектора	Показатель					
	α		R			
	1899–2017 гг.	1899–1948 гг.	1948–2017 гг.	1899–2017 гг.	1899–1948 гг.	1948–2017 гг.
Тихоокеанский	0,58	-0,45	0,99	0,64	0,41	0,64
Атлантический	0,45	-0,55	0,98	0,45	0,43	0,52
Европейский	-0,58	0,08	-0,81	0,69	0,05	0,67
Сибирский	-0,23	-0,98	0,42	0,24	0,47	0,26
Дальневосточный	-0,35	-1,00	0,22	0,36	0,48	0,14
Американский	-0,63	-0,73	-0,59	0,56	0,33	0,33

чима. В первой части ряда ПАВ в пяти из шести секторов наблюдается падение ПАВ, и только Европейский сектор опять проявляет свою уникальность – здесь наблюдается слабый рост ПАВ в первой части ряда и сильное падение ПАВ во второй. Таким образом, только для трех секторов отмечаются статистически значимые величины падения (Европейский сектор) и роста (Тихоокеанский и Атлантический секторы) ПАВ за весь исследуемый период и последние 70 лет (1948–2017 гг.).

Следует обратить внимание на практически неизменную скорость падения ПАВ на протяжении всего 118-летнего периода в Американском секторе. Для этого сектора почти синхронно с Дальневосточным и Сибирским секторами отмечалась кратковременная отрицательная флуктуация ПАВ в 80-е–середине 90-х годов прошлого столетия. Величина линейного падения ПАВ в Американском, Дальневосточном и Сибирском секторах в среднем составила около 20 % от общей дисперсии ряда.

В континентальных секторах Северного полушария отмечается многолетнее падение ПАВ (табл. 3). Однако только в Европейском секторе уменьшение ПАВ является статистически значимым. Величины изменения коэффициентов корреляции для всего доступного ряда и последней части ряда отличается незначительно. В Американском секторе, где наблюдается уменьшение ПАВ для всего доступного ряда и части ряда, коэффициент линейного тренда практически не изменяется, но коэффициент корреляции для части ряда оказался почти в 1,7 раза слабее, чем для всего доступного ряда.

Из табл. 3 следует, что в многолетнем разрезе в изменении ПАВ в Тихоокеанском и Американском секторах отмечается отчетливая обратная связь, что вполне объяснимо с позиций наличия обратных связей метеорологических характеристик на западной и восточной части Алеутского минимума: Американский сектор находится под влиянием циркуляции, характерной для восточной части Алеутского минимума.

Наименьшие по величине трендовые составляющие ПАВ характерны для Сибирского и Дальневосточного секторов. Если рассмотреть только вторую часть ряда, то для этих секторов трендовые составляющие в изменении ПАВ малы по величине и статистически незначимы.

Результаты проведенного сравнительного анализа коэффициентов детерминации (R^2) линейных трендов ПАВ в различных секторах Северного полушария показали, что только в Тихоокеанском и Европейском секторах величина детерминации составляет 0,41–0,48 за весь исследуемый период и последние 70 лет, т.е. линейный тренд объясняет около 40–50 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе этот показатель составляет около 30 % для всего доступного ряда.

В общей изменчивости ПАВ, кроме линейного тренда, также установлены 50–60- и 20–30-летние составляющие. С учетом этого разработана трехкомпонентная модель ПАВ, учитывающая трендовую и периодические составляющие временного ряда ПАВ. Доля трех составляющих в общей дисперсии исходного ряда ПАВ наибольшая в Тихоокеанском и Европейском секторах (около 0,7), несколько ниже она в Американском (0,65) и Дальневосточном (0,60). В остальных секторах трехкомпонентная модель описывает менее 50 % общей дисперсии ПАВ: в Атлантическом секторе доля рассмотренных составляющих ряда ПАВ – около 0,47, в Сибирском секторе – около 0,4. Результаты аппроксимации трехкомпонентной моделью исходных временных рядов ПАВ представлены на рис. 2.

Связь продолжительности арктических вторжений с характеристиками общей циркуляции атмосферы. Трендовая составляющая в продолжительности арктических вторжений в Европейском секторе коррелирует отрицательно с трендовой составляющей повторяемости глубоких циклонов в Европе, т.е. большая повторяемость глубоких циклонов в Европе соответствует малой продолжительности арктических вторжений. В средней полосе частот (20–30 лет) связь сопоставляемых характеристик имеет отрицательный знак для периода времени с 50-х годов прошлого столетия, а в 40-е годы прошлого столетия период высокой повторяемости глубоких циклонов совпал с высокими значениями ПАВ. Аналогичная ситуация сложилась и в 10–20-е годы прошлого столетия, когда минимальная повторяемость глубоких циклонов



Рис. 2. Временные ряды среднегодовой частоты арктических вторжений в секторах Северного полушария и их аппроксимация в виде линейного тренда с наложенными на него двумя гармоническими колебаниями с указанными периодами (T). Экстраполяция рядов до 2025 г. (пунктир) – расчет по аппроксимационной модели в предположении излома тренда в 2015 г.

совпала с низкой повторяемостью ПАВ. Эти результаты свидетельствуют о неустойчивости связи между повторяемостью глубоких циклонов и ПАВ в Европейском секторе.

Число тропических штормов в Северной Атлантике уменьшалось с 1880 до начала 20-х годов XX в., затем наблюдался его коротковременный, но быстрый рост до середины 30-х годов прошлого столетия. В промежуток времени с 30-х до середины 80-х годов число тропических штормов колебалось около средней величины, а затем начался его рост [7]. Близкие тенденции характерны и для изменений ПАВ в Атлантическом секторе, что свидетельствует о наличии связи сопоставляемых характеристик циркуляции атмосферы.

Число мощных тропических циклонов (штормов) в Атлантическом океане росло синфазно с изменением ПАВ, начиная с 90-х годов и до 2013 г., а затем наступило их небольшое падение. Небольшой всплеск числа ПАВ с 2003 г. наблюдался и в Европейском секторе. В конце 40-х годов прошлого столетия число мощных тропических циклонов до начала 60-х годов было близко к среднему значению, а с конца 60-х годов стало намного ниже его, что продолжалось до начала 90-х годов прошлого столетия. Сравнивая характер изменения числа мощных тропических циклонов с изменчивостью ПАВ в Атлантическом океане, можно сделать вывод о синхронности изменения указанных характеристик на протяжении последнего 70-летнего периода.

С ледовитостью Арктики тесно связан циклогенез в Европейском и Атлантическом секторах и, как следствие, ПАВ. Связь продолжительности арктических вторжений в Европейском секторе с повторяемостью и траекториями циклонов в различных зонах континентальной части Европы нами исследовалась с использованием данных, приведенных в работах [8, 9]. В указанных работах рассмотрены траектории циклонов различной мощности и продолжительности жизни, которые пересекали меридианы 5° , 20° и 50° в.д. в широтном поясе от 67° с.ш. до 52° с.ш. Отдельно рассматривались три сектора: $5-20^\circ$ в.д., $20-35^\circ$ в.д. и $35-50^\circ$ в.д.

На территории Беларуси, которая располагается в южной части рассматриваемой зоны ($56-52^\circ$ с.ш.), среднегодовая повторяемость циклонов и глубоких циклонов падает, что согласуется с характером изменения ПАВ за рассматриваемый период. Граница раздела разных знаков тренда в повторяемости циклонов проходит несколько севернее территории Беларуси. Причем различие в повторяемости циклонов и повторяемости мощных циклонов несколько уменьшалось, начиная с 1948 г. от 8–9 до 5 случаев к началу текущего столетия. Для зимних циклонов и глубоких циклонов такой особенности не отмечается: разность повторяемости циклонов и глубоких циклонов сохранялась постоянной и составляла в среднем всего один случай, хотя в отдельные годы число глубоких циклонов было на 2–3 случая меньше, чем обычных циклонов. Связь температуры с повторяемостью глубоких циклонов в Прибалтике отрицательная ($R = -0,32$) и статистически значимая ($P_{\text{случ}} < 5\%$).

Таким образом, чем интенсивнее увеличивается число циклонов и глубоких циклонов на широтах севернее территории Беларуси и чем интенсивнее уменьшается их повторяемость в широтной зоне Беларуси, тем сильнее уменьшается продолжительность арктических вторжений в Европейском секторе. Главным регулятором этих процессов является Атлантический сектор, где происходит генерация циклонов (циклогенез). Именно Атлантический сектор является модулятором климата Европы, поскольку здесь формируются циклоны, которые затем по северным или южным территориям выходят на Европу, формируя ее морской климат. Во время потепления климата циклоны проходят по северным траекториям, определяя тем самым потепление Арктики, и, в конечном счете, приводят к уменьшению повторяемости и продолжительности арктических вторжений. Теплая северная Атлантика собственно и обеспечила снижение повторяемости и продолжительности арктических вторжений в последние несколько десятилетий (80-е годы прошлого столетия–первое десятилетие текущего столетия), что вполне объясняется пространственно-временными особенностями развития циклонической деятельности в Атлантическом и Европейском секторах.

Ослабление Северо-Атлантического колебания (САК) в 60-е годы прошлого столетия должно сопровождаться увеличением ПАВ, тогда как усиление САК в 80-е–начале 90-х годов прошлого столетия – уменьшением ПАВ, что в действительности и наблюдалось. В конце 90-х–первом десятилетии текущего столетия произошло сильное увеличение ПАВ в Атлантическом секторе. Оно пришлось на период ослабления САК.

Индекс САК в декабре–феврале падал в 60–70-е годы прошлого столетия; другой период более продолжительного уменьшения индекса САК начался в начале 90-х годов и продолжался до 2012 г., а в самые последние годы наметился рост индекса САК. В противофазе с вышеуказанными изменениями индекса САК проходило изменение продолжительности арктических вторжений в Атлантическом секторе. Подобные изменения индекса САК происходили и в другие периоды года (март–май, июнь–август). Исключение составляет осенний период (сентябрь–ноябрь), когда рост индекса САК начался на десятилетие раньше, чем в выше названные сезоны.

Таким образом, обратная связь изменений индекса САК и продолжительности арктических вторжений очевидна и физически объяснима. Отрицательная связь изменений индекса САК и ПАВ в Сибирском, Дальневосточном, Тихоокеанском и Американском секторах также прослеживается, хотя она и не столь тесная, как в Атлантическом секторе. Это свидетельствует о глобальном проявлении САК в изменении ПАВ. Отрицательная связь сопоставляемых характеристик является особенно тесной в полосе частот 40–60 лет. Квази 50-летняя составляющая в изменении ПАВ достаточно устойчива на протяжении всего анализируемого периода; ее амплитуда испытывает сравнительно небольшие изменения в различных секторах. Наибольшая амплитуда характерна для континентальных секторов: Дальневосточного, Американского и Сибирского (23–29 дней), а в океанических секторах амплитуды этого долгопериодного колебания практически совпадают (около 21 дня), что может свидетельствовать о взаимосвязи изменений гидрометеорологических характеристик в этих двух крупных океанах, имеющих большую долготную протяженность и связывающих южную и северную полярную шапку Земли.

Совершенно иная ситуация складывается в изменении ПАВ в Европейском секторе. Во-первых, в изменении ПАВ здесь прослеживается мощный отрицательный линейный тренд, незначительно уступающий по величине только тренду в Атлантическом и Тихоокеанском секторах. Во-вторых, длительность доминирующего долгопериодного цикла для всего доступного ряда составляет всего 40 лет, а в последней части ряда – 49 лет. При этом фаза этой волны различается на 180° от фазы подобных колебаний в других секторах Северного полушария. В полосе средних частот для всего доступного ряда и последней части ряда наиболее мощными соответственно являются 19- и 28-летние компоненты. Таким образом, структура изменений ПАВ в Европейском секторе существенно отличается от структуры изменений ПАВ в других секторах, и в настоящее время затруднительно дать сколько-нибудь аргументированное объяснение этому факту.

Наиболее детально связь многолетних колебаний в климатической системе с элементарными циркуляционными механизмами исследовалась в работах Н. К. Кононовой [6–8]. Интенсивность циклонической деятельности в средних и высоких широтах, равным образом как и интенсивность алеутской депрессии, поддерживается активным межширотным обменом. Об этом свидетельствуют значимые коэффициенты корреляции Арктического колебания, Северо-Атлантического и Тихоокеанского колебания с северными меридиональными ЭЦМ и ЭЦМ нарушения зональности. При всех ЭЦМ, с которыми коррелирует Арктическое колебание, над континентами располагаются мощные зимние антициклоны, а над океанами – глубокие циклоны.

В работах Н. К. Кононовой [2–4] отмечалось, что в 20-м столетии ось арктических вторжений над Евразией смещается к востоку. Одним из проявлений такого процесса явилось уменьшение к концу века продолжительности ЭЦМ с блокирующими процессами в Атлантическом секторе и рост продолжительности ЭЦМ с блокирующими процессами в Дальневосточном. ЭЦМ с блокирующими процессами в холодное время года в Тихоокеанском секторе не наблюдалось, но возросла продолжительность ЭЦМ с блокирующими процессами в Тихом и Атлантическом океанах. В этой же работе показано, что имеются значимые положительные коэффициенты корреляции Североатлантического колебания и ЭЦМ в середине зимы, когда блокирующие процессы развиваются над Восточной Сибирью и Америкой, а атлантические циклоны свободно проходят над Атлантическим и Европейским секторами.

Выводы. С использованием классификации атмосферных циркуляционных механизмов по Б. Л. Дзердзеевскому определены ПАВ в различных секторах Северного полушария. Исследование позволило установить пространственные связи и временную изменчивость ПАВ в разных секторах Северного полушария. В изменении ПАВ за период с 1899 по 2017 г. выявлены трендовые и циклические составляющие. Знак трендов ПАВ в различных секторах Северного полушария испытывает изменения как для всего доступного ряда, так и для его отдельных частей. Наибольший по величине положительный тренд характерен для Тихоокеанского и Атлантического секторов, а отрицательный – для Европейского и Американского секторов.

Трендовые составляющие в изменении ПАВ в Тихоокеанском и Европейском секторах выбирают более 40 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе тренд ПАВ сохраняет отрицательный знак весь период наблюдений (1899–2017 гг.), а коэффициент детерминации составляет около 30 %.

Трехкомпонентная модель ПАВ, включающая линейный тренд, 20–30- и 50–60-летние составляющие изменений ПАВ, показывает, что максимальная доля этих составляющих в общей дисперсии ряда ПАВ (0,7) характерна для Тихоокеанского и Европейского секторов, в Сибирском и Атлантическом секторах она снижается до 0,4–0,5.

Установлена связь общей циркуляции атмосферы и климата в океанических и континентальных секторах Северного полушария с продолжительностью арктических вторжений. Особое внимание уделено оценкам связи крупномасштабных колебаний и центров действия атмосферы (Исландского и Алеутского минимумов, Азорского и Гонульського максимумов) с продолжительностью арктических вторжений, а также связям ПАВ с циклонической деятельностью. Чем интенсивнее растет число циклонов и глубоких циклонов на широтах севернее Беларуси и чем интенсивнее уменьшается их повторяемость в широтной зоне Беларуси, тем сильнее уменьшается продолжительность арктических вторжений в Европейском секторе. Главным регулятором этих процессов является Атлантический сектор, где происходит генерация циклонов.

Список использованных источников

1. Дзердзеевский, Б. Л. Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристики синоптических сезонов / Б. Л. Дзердзеевский, В. М. Курганская, З. М. Витвицкая // Тр. Науч.-исслед. учрежд. Гл. управления гидрометеоролог. службы при СМ СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. – М.– Л.: Гидрометеоздат, 1946. – 80 с.
2. Кононова, Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / Н. К. Кононова. – М.: РАН, Институт географии, 2009. – 370 с.
3. Кононова, Н. К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 108–123.
4. Кононова, Н. К. Флюктуации глобальной циркуляции атмосферы в XX–XXI вв. / Н. К. Кононова // IGU Regional Conference, Институт географии РАН, РФ, Москва, 2015. – М., 2015. – 16 с.
5. Холопцев, А. В. Продолжительные арктические вторжения и Эль-Ниньо–Южное колебание / А. В. Холопцев, В. А. Семенов, Н. К. Кононова // Изв. РАН. Сер. Географ. – 2018. – № 4. – С. 22–32.
6. Folland, C. Global climate monitoring and assessing climate change / C. Folland, D. Parker // Processing World climate change conference, Moscow, Sep. 29–Oct. 2 2003. – P. 68–80.
7. Whitney, L. D. The Relationship between sea surface temperatures and maximum intensities of tropical cyclones in eastern North Pacific Ocean / L. D. Whitney, J. S. Hobgood // J. Climate. – 1997. – Vol. 10. – P. 2921–2930.
8. Sepp, M. Influence of atmospheric circulation on Environment variables in Estonia / M. Sepp. – Tartu, 2005. – 155 p.
9. Sepp, M. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe / M. Sepp, P. Post, J. Jaagus. // Nordic Hydrology. – 2005. – № 1. – P. 1–14.

Поступила 05.11.2019